

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
「水道システムにおける生物障害の実態把握とその低減対策に関する研究」
分担研究報告書

研究課題：曝気循環によるアオコ・カビ臭の抑制

研究代表者 秋葉 道宏 国立保健医療科学院 統括研究官
研究協力者 太田志津子 水資源機構環境室 水環境課長
今本 博臣 水資源機構環境室 水環境課参事役

研究要旨

曝気循環設備によるアオコ・カビ臭抑制効果を把握するため、9 ダム貯水池で実証実験を行った。その結果、貯水池総リン濃度が 0.04mg/L 以下のダム貯水池の場合は、年最大水温勾配を 0.1 /m 以下になるように曝気循環設備を運転すれば、*Microcystis* によるアオコを抑制することがわかった。一方、カビ臭原因藻類である *Anabaena*、*Phormidium* と *Oscillatoria* については、曝気循環設備を運転しても、抑制効果が見られるケースと見られないケースがあった。

A. 研究目的

曝気循環設備は、アオコ・カビ臭による水質障害の抑制対策として、多くのダム貯水池で採用されている。しかし、曝気循環設備の運転で水質障害が抑制できたダム貯水池がある一方で、抑制に至らないダム貯水池も存在している。このような水質障害の抑制と水温勾配との関連を分析した結果、水質障害が抑制できたダム貯水池は水温勾配がほぼ 0 /m になっているが、水質障害が抑制できていないダム貯水池は水温勾配が残っていることがわかった¹⁻³⁾。このため、アオコ・カビ臭による水質障害が発生しているダム貯水池において、水温勾配がおおむね 0 /m になるように曝気循環設備を増設・新設した。

本報告では、これらの実証実験結果から得られた水温勾配のデータとアオコ・カビ臭による水質障害の抑制効果との関係について検討した。

B. 研究方法

1) 対象 9 ダムの諸元

水資源機構では、アオコ・カビ臭による水質障害が継続して発生している 9 ダムに曝気循環設備を増設または新設した。9 ダムの諸元及び実験結果の概要を表 1 に示す。対象となるダム貯水池は、洪水期の貯水容量が

4,000 千 m³ の小規模ダムから 33,000 千 m³ の大規模ダムまで、貯水池総リン濃度は過栄養の A ダムから中栄養の I ダムまで広範囲に及んでいる。

2) 測定期間と方法

2 - 1) 水温

ダム貯水池の水温は、取水口付近に設置されている自動観測装置または水温データロガーを用いて、0.1m、0.5m、1m 以下 1m ピッチに曝気循環設備の吐出口より深い水深まで測定した。測定期間は 2003 年～2013 年までの 11 年間、測定間隔は施設によって 1 時間～6 時間となっている。

2 - 2) 水質・藻類

ダム貯水池の総リン濃度は、2003 年～2013 年までの期間に取水口付近の表層 0.5m で毎月 1 回測定したデータのうち、曝気循環設備を運転する 5 月から 10 月までの全平均値で比較した。また藻類は、取水口付近の表層 0.5m で毎月 1 回測定したデータのうち、5 月から 10 月までの最大細胞密度で比較した。

なお、B、C、F ダムは曝気循環設備の設置前後を比較するため 2000 年～2013 年までのデータを使用した。

2 - 3) 水温勾配

貯水池の水が循環するためには、表層から中層にかけての水温勾配を解消することが必要となるが、太陽放射エネルギーが勝る昼間は解消できない。しかし、放射冷却が進む夜間から朝方は解消することが可能である。このため、曝気循環設備の能力は日最低水温勾配で評価した。

日最低水温勾配の式は、水深 0.5m ~ 3m における 1m あたりの水温勾配が一日の内で最も小さくなった値と定義した。

日最低水温勾配 = $\text{Min} \{ (0.5\text{m の水温} - 3.0\text{m の水温}) \div 2.5\text{m} \}$ ……

月平均水温勾配は、日最低水温勾配の月平均とした。

年最大水温勾配は、年間で最も高い月平均水温勾配とした。ただし、曝気循環設備を運転している(水温躍層がない)時期に洪水(貯水池表層に比べて水温が低い)の影響で水温勾配が大きくなった月の値は除外した。

C. 研究結果および D. 考察

1) 曝気循環設備増設(設置)前後における月平均水温勾配

曝気循環設備増設(設置)前後における月平均水温勾配を図-1 に示す。曝気循環設備増設(設置)後の月平均水温勾配は、洪水流入による影響で水温勾配が上昇している月を除けば全ダムで低下している。全ダムの年最大水温勾配の範囲は、曝気循環設備設置前が 0.39 ~ 1.54 /m、曝気循環設備増設前が 0.01 ~ 1.06、曝気循環設備増設(設置)後が 0.00 ~ 0.13 /m の範囲(表 1)となっており、循環が進んでいることが分かる。

2) 藻類の綱別、属別の比較

曝気循環設備増設(設置)前後における藻類の綱別の発生細胞密度を図 2 に示す。

多くの藍藻は、ガス胞を持っており浮上調節能力が高いという特徴があるが⁴⁾、曝気循環による流動でその能力が無力化したため³⁾、全てのダム(富栄養化した河川水を不定期に注水して貯留する H ダムを除く)で細胞密度が低下したものと考えられる。

ガス胞を持たない緑藻は⁵⁾、藍藻ほど明瞭な低下傾向を示していない。緑藻は、曝気循環による流動で中層の無光層に藻体が運ばれるため増殖スピードは低下するが、藍藻に

比べると耐暗性が高いため⁶⁾ 顕著な低下傾向を示さなかったものと考えられる。

珪藻や渦鞭毛藻も曝気循環による影響がみられない。珪藻は、藍藻に比べると耐暗性が高いという特徴があるため⁶⁾、ほとんど低下しなかったものと考えられる。また渦鞭毛藻は、鞭毛による鉛直遊泳速度が最大で 50m/日⁷⁾ にも及ぶため、曝気循環による流動に対しても低下傾向を示さなかったものと考えられる。

曝気循環設備増設(設置)前後における藍藻の属別発生細胞密度を図 3 に示す。

細胞内にガス胞を持つ *Microcystis*⁴⁾ (アオコ発生の閾値である 10,000 細胞/mL⁸⁾ 以下は評価しない)は、全貯水池で細胞密度が低下した(写真 1)。なお、C ダムは、曝気循環設備増設後の 2013 年 10 月に、一時的に 27,000 細胞/mL まで増加した。これは、台風により栄養塩が大量に流入した影響であると考えられる。また、D ダムは、曝気循環設備増設後の 2013 年 9 月に一時的に 26,000 細胞/mL まで、E ダムは曝気循環設備設置後の 2013 年 8 月に、一時的に 17,000 細胞/mL まで増加した。これらは、採水地点周辺にだけ *Microcystis* が滞留していたことによる影響であり、貯水池全体としてはアオコ状態になっていない。

一方、*Microcystis* と同様にガス胞を持つ *Anabaena*⁴⁾ (カビ臭発生の閾値である 100 細胞/mL⁸⁾ 以下は解析対象としない)は、*Microcystis* のような顕著な低下傾向を示していない。*Anabaena* は、*Microcystis* 比べて増殖に適した水温が低い⁹⁾ため、曝気循環による表層水温の低下が増殖に大きな影響を与えないこと、また、ガス胞による浮上能力が低い¹⁰⁾ため、曝気循環でその浮上能力が無力化されても増殖に大きな影響を与えない可能性が考えられる。

ガス胞を持たないとされている *Phormidium*⁵⁾ (カビ臭発生の閾値である 1000 細胞/mL⁸⁾ 以下は解析対象としない)は、曝気循環設備増設(設置)後におおむね低下傾向を示している。またガス胞を持つ種ともたない種が報告されている *Oscillatoria*⁵⁾ は、過去にほとんど確認されていなかったが、D ダムと H ダムで上昇傾向を示した。

このように、*Anabaena*、*Phormidium*、*Oscillatoria* の 3 種は、*Microcystis* の減少にともない増加傾向を示す可能性があるこ

とから、曝気循環設備の運転パターンとこれらの種の消長について更なる検討が必要であると考えられる。

3) アオコ・カビ臭発生と水温勾配

年最大水温勾配及び貯水池総リン濃度とアオコ・カビ臭発生との関係を図 4(右)に示す。アオコレベルは、年最大水温勾配が小さくなるにつれて、また、貯水池総リン濃度が小さくなるにつれて低下傾向を示している。

図 4(左)に、アオコを抑制するために必要となる年最大水温勾配の目標値を示す。

アオコの抑制を目指す場合は、貯水池総リン濃度が 0.04mg/L 以下であれば、年最大水温勾配を 0.1 /m 以下にすれば良いと考えられる。また、小規模なアオコの発生を許容する場合は、貯水池総リン濃度が 0.05mg/L 以下であれば、年最大水温勾配を 0.3 /m 以下にすれば良いと考えられる。なお、貯水池総リン濃度 0.05mg/L 以上の場合は、曝気循環設備を運転してもアオコの抑制に繋がらない可能性が考えられる。

一方、カビ臭については、年最大水温勾配と貯水池総リン濃度との関係に一定の傾向がみられない。

E. 結論

貯水池総リン濃度が 0.04mg/L 以下の場合、年最大水温勾配を 0.1 /m 以下になるように曝気循環設備を運転すれば、*Microcystis* によるアオコを抑制できることがわかった。一方、カビ臭原因藻類である *Anabaena*、*Phormidium* と *Oscillatoria* については、曝気循環設備を運転しても、抑制効果が見られるケースと見られないケースがあった。ダム貯水池でカビ臭が発生すると、下流浄水場に大きな影響を与えることが懸念されることから、曝気循環設備の規模や運転パターンとカビ臭原因藻類抑制との関係について、更に実証データを蓄積し検証していく必要がある。

G. 研究発表

1) 論文発表

今本博臣，田作光良，古里栄一（2013）曝気循環によるアオコ・カビ臭抑制の効果検証 9 ダム貯水池の実証実験結果か

ら，ダム工学 23(4)，278-289．

2) 学会発表

今本博臣，太田志津子，田作光良（2013）曝気循環設備を用いたアオコ・カビ臭抑制のための実証実験，応用生態工学会第 17 回研究発表会

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定も含む。）

1) 特許取得

該当なし

2) 実用新案登録

該当なし

3) その他

I. 参考文献

- 1) 今本博臣，楨暁史，広瀬真由，古里栄一（2011）朝方の水温勾配を用いた曝気循環の効果判定，ダム工学 21(2)，96-106．
- 2) 今本博臣（2012）ダム貯水池における水質改善対策，水環境学会誌 35(A)3，87-91．
- 3) 今本博臣，田作光良，古里栄一（2013）曝気循環によるアオコ・カビ臭抑制の効果検証 9 ダム貯水池の実証実験結果から，ダム工学 23(4)，278-289．
- 4) 渡辺真利代，原田健一，藤木博太（1994）アオコその出現と毒素，東京大学出版会，東京．
- 5) Reynolds, C. S. (1984) The ecology of freshwater phytoplankton, Cambridge University Press, Cambridge.
- 6) 古里栄一，浅枝隆，福渡隆（2011）淡水植物プランクトンの耐暗性について，水環境学会誌 24(1)，27-34.
- 7) 山田正人，宗宮功，安永望，小野芳朗：（1995）渦鞭毛藻 *Peridinium* の走行性による遊泳速度に関する研究，*Jpn.J.Limnol.*, 56(2), 125-135．
- 8) ダム工学会維持管理研究部会（2013）ダム貯水池水質の保全に関する総合的研究，ダム工学 23(3)，218-236．
- 9) 水資源機構（2013）ダム貯水池等の水質保全対策，水質改善のための実証実験

, p1-12.

- 10) 中野伸一，中島拓男（1995）深まるア
オコ発生の謎，琵琶湖研究所ニュース，
オウミア **54**.

J. 謝辞

本報告書を作成するにあたり、水資源
機構「水質の保全・改善プロジェクトチ
ーム」の皆さんには実証実験を実施して
いただきました。ここに記して謝意を表
します。

表1 9ダムの諸元と実験結果の概要

ダム名		Aダム	Bダム	Cダム	Dダム	Eダム	Fダム	Gダム	Hダム	Iダム
曝気設備 (年)	設置前	管理開始 から設置	~ 2001	~ 2006	管理開始 から設置	~ 2009	~ 1998	~ 2005	管理開始 から設置	~ 2010
	増設前	1994 ~ 2010	2004 ~ 2011	2007 ~ 2010	2008 ~ 2011		2003 ~ 2010		1999 ~ 2011	
	増設後	2011 ~	2012 ~	2011 ~	2012 ~	2012 ~	2011 ~	2008 ~	2012 ~	2011 ~
洪水期の貯水容量 (10 ³ m ³)		10,000	21,400	15,800	11,900	10,750	11,000	32,000	4,000	33,000
洪水期の湛水面積 (km ²)		0.81	1.41	0.80	0.78	0.78	0.90	1.25	0.26	0.98
貯水池総リノ濃度 (mg/L)		0.075 ~ 0.117	0.035 ~ 0.092	0.028 ~ 0.059	0.028 ~ 0.043	0.019 ~ 0.033	0.017 ~ 0.040	0.015 ~ 0.029	0.014 ~ 0.020	0.009 ~ 0.018
年最大水温勾配 (/m)	設置前	管理開始 から設置	0.45 ~ 0.52	0.85 ~ 1.54	管理開始 から設置	0.39 ~ 0.51	データなし	0.58 ~ 1.32	管理開始 から設置	0.58 ~ 1.17
	増設前	0.09	0.02 ~ 0.25	0.31 ~ 1.06	0.11 ~ 0.17	-	0.35 ~ 0.84	-	0.01 ~ 0.08	-
	増設後	0.03	0.04 ~ 0.06	0.0 ~ 0.05	0.03 ~ 0.04	0.06 ~ 0.08	0.10 ~ 0.13	0.03 ~ 0.11	0	0.0 ~ 0.08
アオコ (M.)	設置前	-	あり	あり	-	あり	あり	あり	-	あり
	増設前	あり	なし	あり	あり	-	あり	-	あり	-
	増設後	減少	なし	減少	なし	なし	減少	減少	減少	なし
カビ臭	設置前	-	A.	A.	-	なし	A. P	A.	-	A.
	増設前	A.	減少	A.	A. P.	-	なし	-	A.	-
	増設後	A.	なし	A.	P. O.	A.	Aph.	なし	O.	なし

M. : *Microcystis* , A. : *Anabaena* , P. : *Phormidium* , ; O. : *Oscillatoria* , Aph. : *Aphanizomenon*

□ 曝気循環設備設置前 ■ 試運転 ■ 増設前 ■ 増設後 ☒ 洪水時

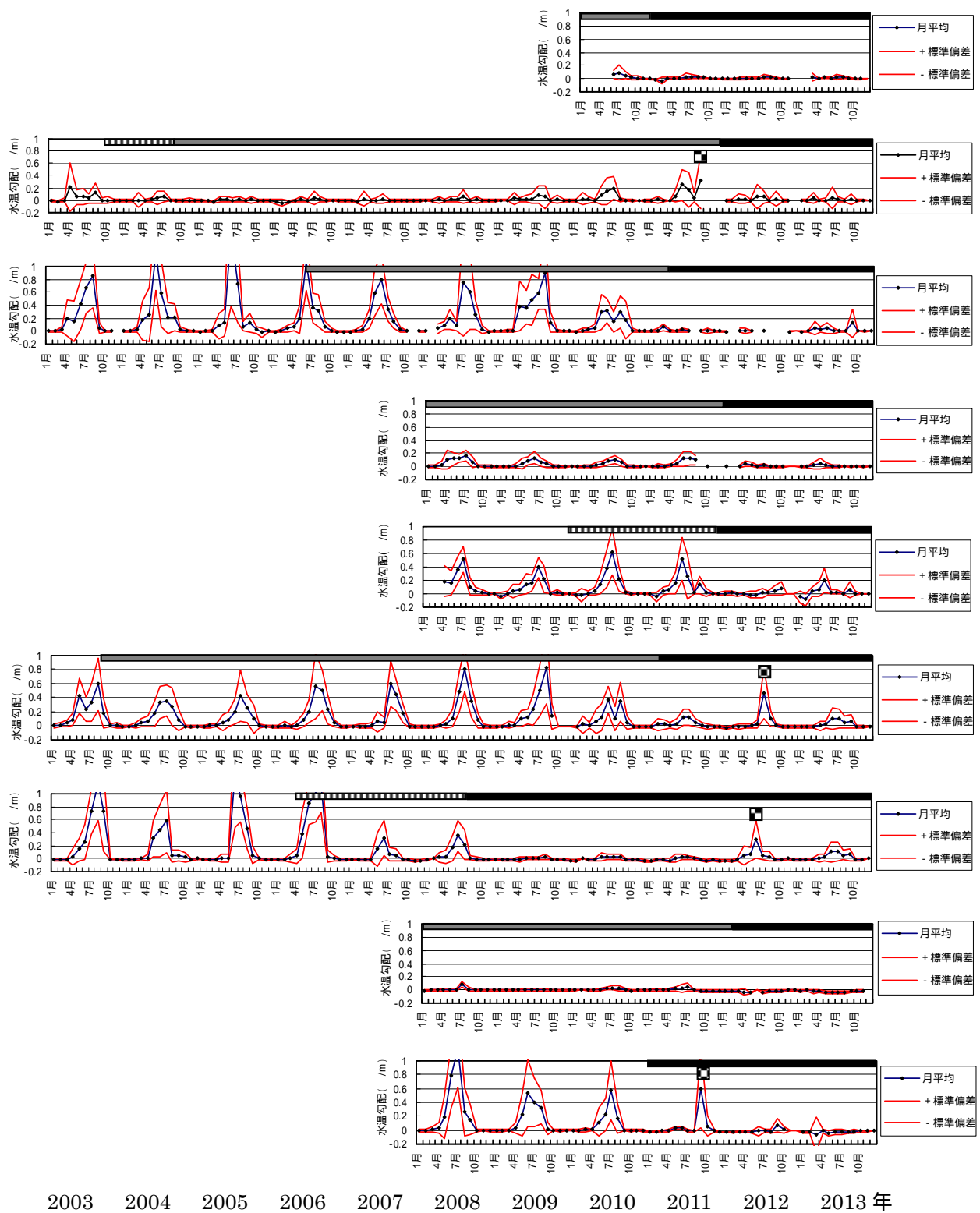


図1 曝気循環設備増設（設置）前後における月平均水温勾配と標準偏差
上からA、B、C、D、E、F、G、H、Iダム

□ 曝気循環設備設置前 ■ 増設前 ■ 増設後

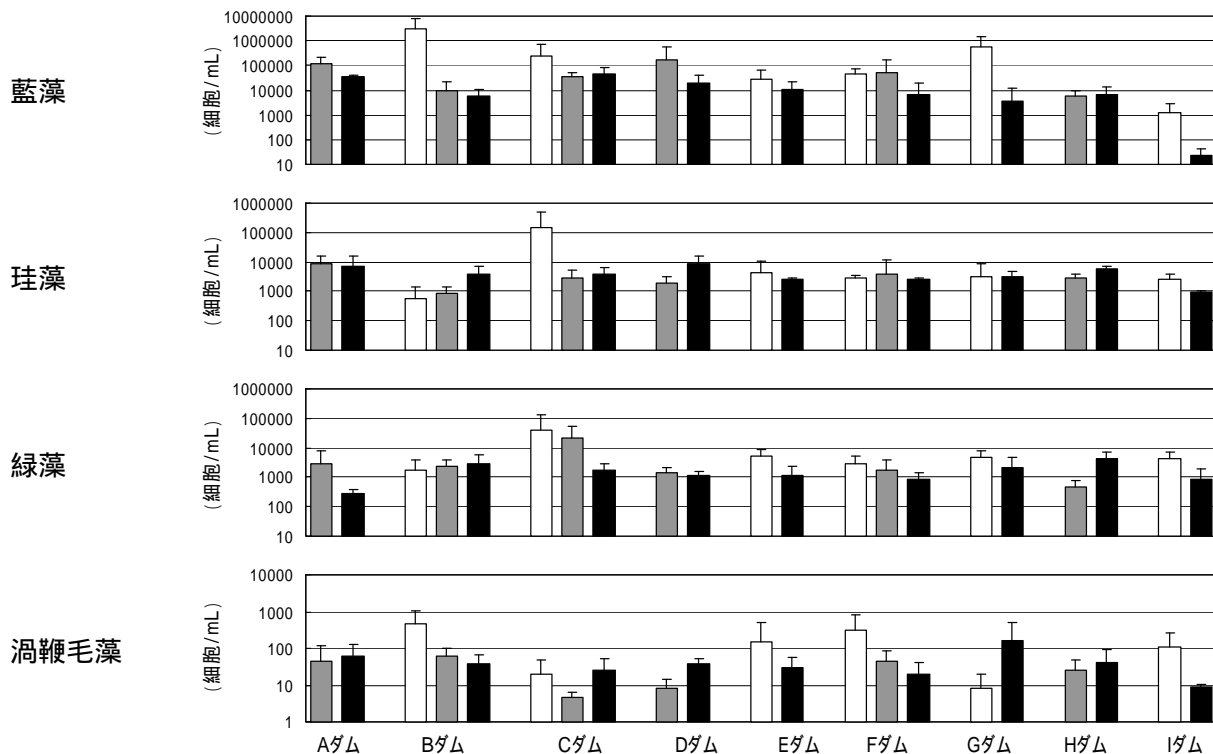


図2 曝気循環設備増設（設置）前後の藻類の網別発生細胞密度（年最大値の平均）
棒グラフは平均値、エラーバーは標準偏差

□ 曝気循環設備設置前 ■ 増設前 ■ 増設後

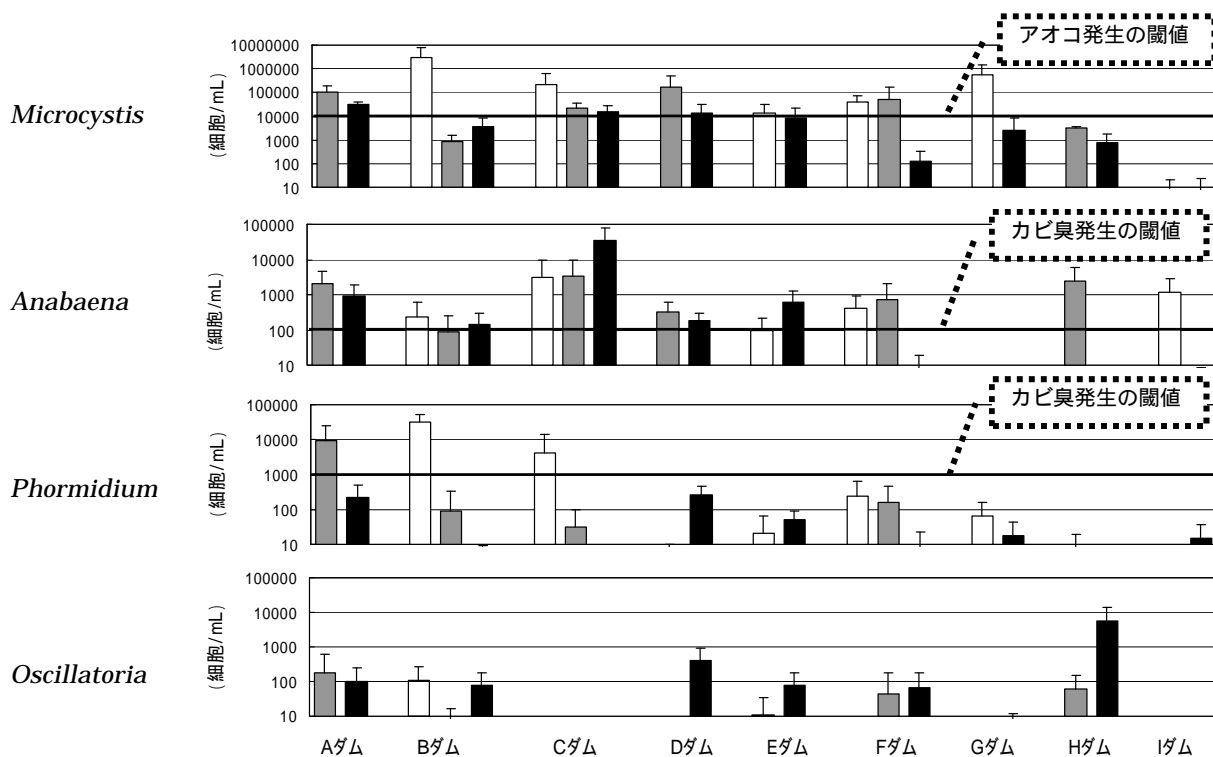


図3 曝気循環設備増設（設置）前後の藍藻の属別発生細胞密度（年最大値の平均）
棒グラフは平均値、エラーバーは標準偏差

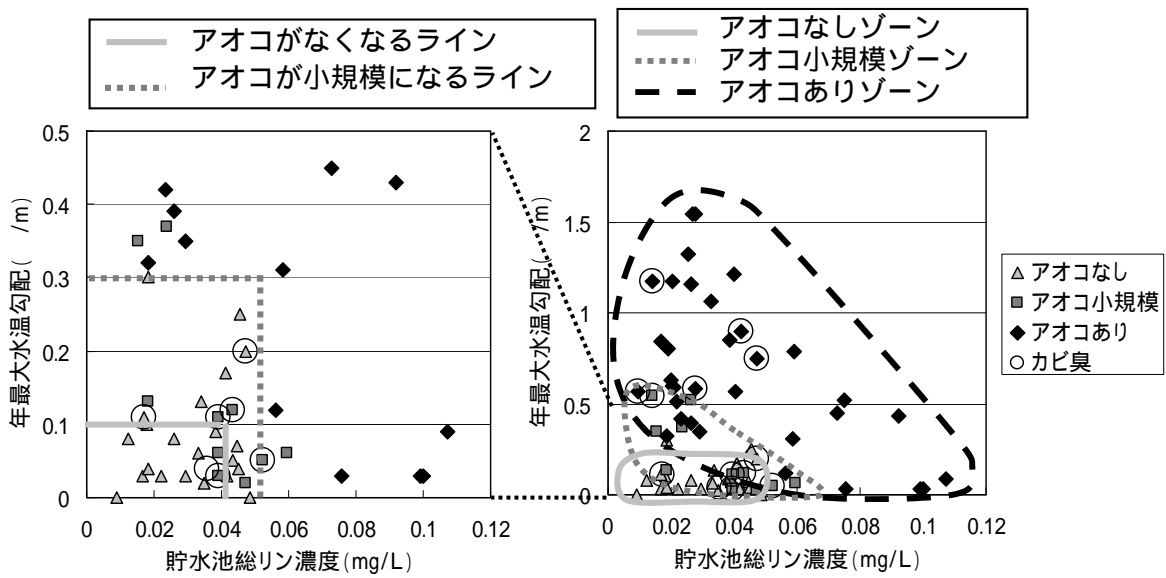


図4 年最大水温勾配及び貯水池総リン濃度とアオコ・カビ臭発生との関係



写真1 曝気循環設備増設前（上）と、増設後（下）のダム貯水池の状況（左からB、C、Fダム）